石河子地区冬小麦生育期需水量变化特征及其气候成因

吴燕锋[1], 巴特尔·巴克[1], 罗那那[1], Rasulov H[2]

(1. 新疆农业大学 草业与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 塔吉克农业大学 水文气象系, 杜尚别 塔吉克斯坦 734003)

摘　要: [目的] 探究作物生育期需水量的变化趋势及其与气象因子的关系,为气候变化下农作物灌溉排水决策提供理论基础。[方法] 基于联合国粮农组织(FAO)推荐的参考作物蒸散计算方法和相关作物系数,利用石河子地区 1954—2012 年逐日气温、降水、日照时数、风速、相对湿度等资料,计算石河子地区冬小麦近 59 a 作物需水量和灌溉需水量,并探究其气候趋势变化的影响。[结果] (1) 过去 50 a,石河子垦区冬小麦需水量总体呈增加趋势,越冬—返青期增势最为明显(气候倾向率为 2.65 mm/10 a);拔节—抽穗期冬小麦需水量最大,为 130.23 mm。(2) 灌溉需水量总体呈减少趋势,其中拔节—抽穗期灌溉需水量最大(平均值为 88.65 mm)且减少趋势最为明显(气候倾向率为−3.11 mm/10 a)。(3) 气象因子对冬小麦不同生育期的需水量和灌溉需水量有很强的相关性,其中冬小麦生育后期需水量与气象因子有极强的相关性;气象因子中,降水对于灌溉需水量影响最大。[结论] 气候变化下,石河子地区冬小麦作物需水量呈增加趋势,但降雨量的增加趋势下,灌溉需水量总体呈减少趋势。

关键词: 石河子地区; 作物需水量; 灌溉需水量; 气候因子; 冬小麦

文献标识码: A　　**文章编号**: 1000-288X(2016)01-0069-06　　**中图分类号**: S161.2, S274

文献参数: 吴燕锋, 巴特尔·巴克, 罗那那, 等. 石河子地区冬小麦生育期需水量变化特征及其气候成因[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 69-74. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.013

Variations in Water Requirement of Winter Wheat at Different Growth Stages and Its Climatic Cause in Shihezi Region

WU Yanfeng[1], BAKE Batur[1], LUO Nana[1], Rasulov H[2]

(1. *College of Grassland and Environmental Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region* 830052, *China*; 2. *Faculty of Hydrometeorology, Tajik Agrarian University, Dushanbe* 734003, *Tajikistan*)

Abstract: [Objective] The object of this study is to investigate the variation trend of crop water requirement and its correlation with climatic factors, so as to provide references for decision making in crop irrigation and drainage. [Methods] The crop water requirement and irrigation requirement of winter wheat in Shihezi region were calculated based on evapotranspiration calculation approach recommended by United Nations FAO and crop coefficient from 1961 to 2012. The variation trend and its climatic causes were analyzed for the crop water requirement and irrigation of winter wheat. [Results] (1) The crop water requirement of winter wheat showed a significant decreasing trend, and the greatest increase occurred at the overwintering and turning green stage with a rate of 2.65 mm/10 a. Winter wheat required the most water at the jointing to heading stage (130.23 mm). (2) In contrast, irrigation water requirement of winter wheat at different growth stages showed a decreasing trend with a rate of −3.11 mm/10 a. The irrigation water requirement of winter wheat was the most at the jointing to heading stage (88.65 mm). (3) Climatic factors such as precipitation, temperature, relative humid, sunshine duration, water pressure, wind speed, showed a strong correlation with the crop water requirement and irrigation requirement of winter wheat. Extremely significant correlation was found between precipitation and the crop water requirement and irrigation requirement of winter wheat.

收稿日期: 2014-12-09　　**修回日期**: 2014-12-19

资助项目: 2014 年度新疆研究生科研创新项目(XJGRI2014079); 国家国际科技合作计划资助(2010DFA92720-13); 新疆维吾尔自治区土壤学重点学科资助

第一作者: 吴燕锋(1986—),男(汉族),河南省沈丘县人,硕士研究生,研究方向为干旱区生态与环境。E-mail: wyfecology@163.com。

通讯作者: 巴特尔·巴克(1973—),男(维吾尔族),新疆维吾尔族自治区莎车县人,博士,教授,主要从事干旱区生态与环境研究。E-mail: bateerbake@163.com。

[Conclusion] Although water requirement of winter wheat increased during the past 52 years, the irrigation requirement of winter wheat showed a decreasing trend, which caused by the increase of precipitation.

Keywords: Shihezi region; crop water requirement; crop irrigation requirement; meteorological factors; winter wheat

作物需水量是作物全生育期消耗于自身蒸腾和棵间土壤蒸发的水量总和,它是灌溉决策和水资源规划的重要基础[1]。气象因子对作物需水量有重要的影响。因此,国内外学者基于气象因子或者长期试验观测针对不同作物的需水量、蒸散量、灌溉需求指数等开展一些研究。中国学者主要在不同地区对主要作物开展了深入研究。符娜[2]、李摇勇等[3]基于逐日气象资料和据 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算水稻需水量,并分析了气候变化下中国西南地区和长江中下游地区水稻不同生育期灌溉需水量的变异性及灌溉需求指数分布。杨晓琳等[4]探究了黄淮海地区玉米需水量的时空变化特征,南纪琴等[5]从不同水文年型角度分析了中国北方春玉米需水量的时空特征,宋妮[6]和杨晓琳等[7]分别探究了河南省和黄淮海农作区冬小麦作物需水量时空变化及其气候要素的影响。蔡超等[8]利用全国 93 个气象站点的资料,分析了全国近 50 a 玉米、小麦、大豆和水稻的蓝水蒸发量及蓝水需水量的分布和变化。

灌溉在新疆石河子垦区占有极为重要的作用,拟探究气候变化下石河子农作物需水量和灌溉需水量对垦区农业发展有重要意义,而目前对于石河子垦区冬小麦不同生育期灌溉需水研究较少[9-10]。因此,本文基于垦区近 50 a 的气象资料,探讨垦区冬小麦不同生育期需水量和灌溉需水量的变化趋势及其与气象因子的关系,从而为气候变化下冬小麦需水量和灌溉需水量以及灌溉排水决策提供理论基础。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

石河子垦区地处天山北麓中段古尔班通古特沙漠南缘,属典型的温带大陆性气候,夏季短暂而炎热,冬季漫长而寒冷,年平均气温 7.5～8.2 ℃,日照时数 2 318～2 732 h,无霜期 147～191 d,年降水量 110～200 mm。石河子垦区水资源主要来自玛纳斯河,多年径流量为 1.27×10^9 m^3,径流季节性变化大。由于具有丰富的光热气候资源和较为稳定的地表水资源和广袤的土地,加之生产管理水平和较高的农业机械化水平,使得石河子垦区成为新疆天山北坡经济带中重要的粮食、棉花和特色水果生产基地。农作物中,小麦种植达到了 1.07×10^4 hm^2。

1.2 数据来源

本文所用资料是由国家气象信息中心提供的 1954—2012 年石河子、乌兰乌苏、莫索湾和炮台的逐日气温、降水、日照时数、风速、相对湿度等资料。由于站点资料的时间长度不一致,为确保资料的可靠性和一致性,选取 1961—2012 年的气象观测资料进行研究。

1.3 研究方法

1.3.1 冬小麦需水量 冬小麦需水量(ET_c)计算公式如下[11]:

$$ET_c = ET_0 \times K_c \quad (1)$$

式中:ET_0——参考作物需水量(mm)。采用 FAO56 推荐的 Penman-Monteith 公式[12]计算;K_c——作物系数,石河子地区冬小麦生育期和作物系数分别为[13]:播种—分蘖期(9 月 15 日—10 月 10 日,K_c=1.04);分蘖—越冬期(10 月 11 日—11 月 15 日,K_c=2.53);越冬—返青期(11 月 16 日—3 月 31 日,K_c=0.95);返青—拔节期(4 月 1 日—4 月 23 日,K_c=0.51);拔节—抽穗期(4 月 24 日—5 月 23 日,K_c=0.98);抽穗—成熟期(5 月 24 日—6 月 7 日,K_c=0.43);全生育期(9 月 15 日—次年 6 月 7 日,K_c=0.79)。

1.3.2 冬小麦灌溉需水量 由于土壤水和地下水对大气降水具有巨大调蓄作用,作物需水量和有效降水量的差值定义为灌溉需水量 IR[14],计算公式如下:

$$I_R = ET_c - P_e \quad (2)$$

式中:I_R——作物灌溉需水量(mm);P_e——作物生育期有效降雨量(mm)。

2 结果与分析

2.1 冬小麦不同生育期需水量变化特征

图 1 可以看出,过去 52 a,石河子地区冬小麦需水量在不同的生育期变化趋势和变幅有所不同。变化趋势上,分蘖—越冬期呈轻微的减少趋势,气候倾向率为－0.03 mm/10 a。播种—分蘖期、越冬—返青期、返青—拔节期、拔节—抽穗期和抽穗—成熟期,冬小麦的需水量都呈增加趋势,其中,越冬—返青期增势最为明显,气候倾向率为 2.65 mm/10 a($p<0.05$),其次为拔节—抽穗期、抽穗—成熟期,气候倾向率分别为 1.25 和 1.11 mm/10 a;播种—分蘖期和返青—拔节期略有增势,气候倾向率分别为 0.38 和

0.08 mm/10 a。作物需水量上,各生育期平均需水量中,拔节—抽穗期冬小麦需水量最大,为 130.23 mm,其次是分蘖—越冬期(73.55 mm)、越冬—返青期(64.29 mm)和播种—分蘖期(63.13 mm),返青—拔节期和抽穗—成熟期冬小麦需水量最少,分别为 49.42 和 33.86 mm。

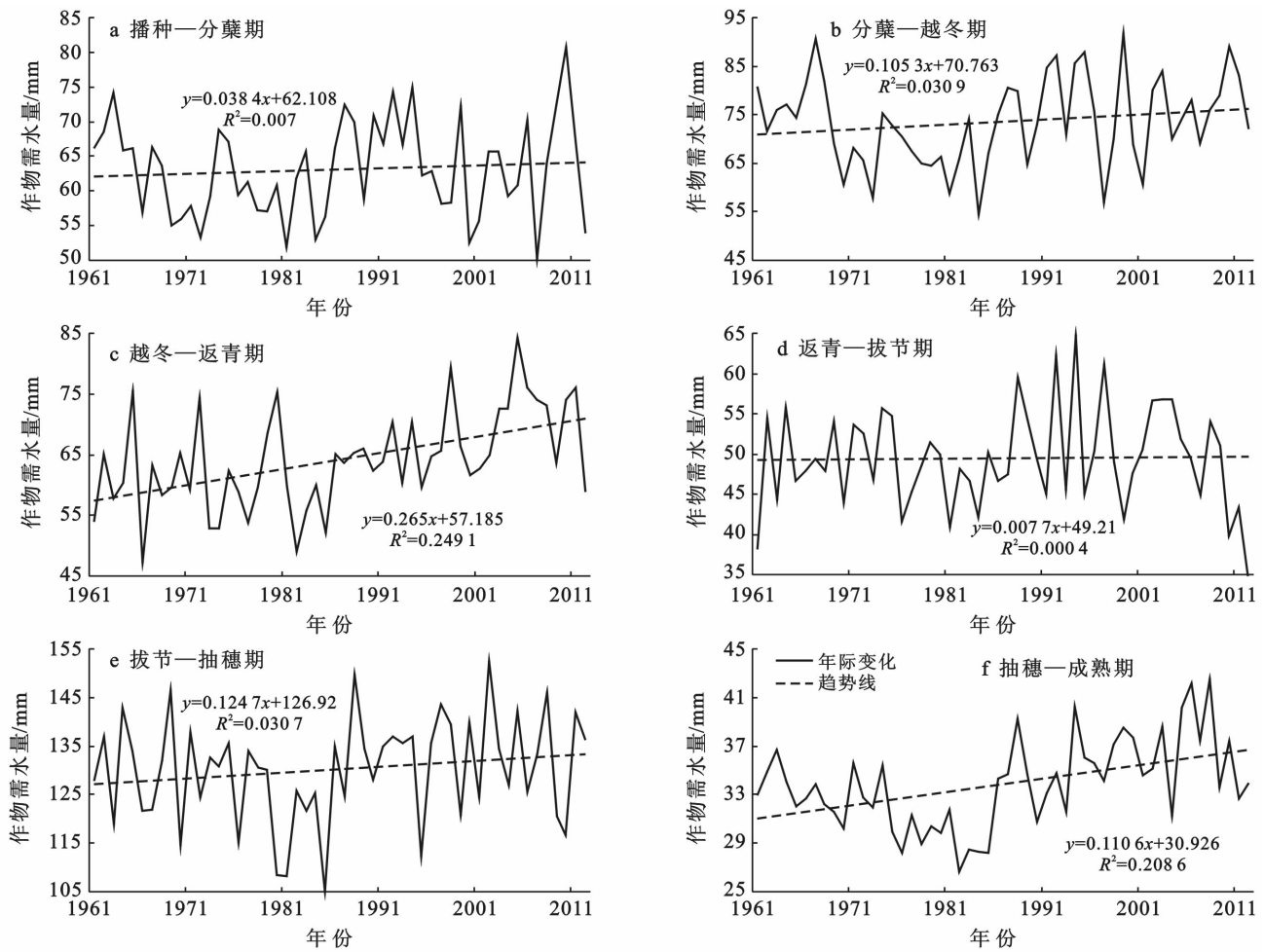


图 1　冬小麦不同生育期需水量的变化特征

2.2　冬小麦不同生育期灌溉需水量变化特征

图 2 为冬小麦不同生育期灌溉需水量的变化特征。可以看出,生育期内冬小麦的灌溉需水量都呈减少趋势,其中,拔节—抽穗期减少趋势最为明显(气候倾向率为−3.11 mm/10 a,$p<0.01$),其次是播种—分蘖期、越冬—返青期和返青—拔节期,气候倾向率分别为−2.76 mm/10 a($p<0.05$),−1.57 mm/10 a($p<0.01$)和−1.25 mm/10 a($p>0.05$),分蘖—越冬期和抽穗—成熟期减势不明显。6 个生育期中,拔节—抽穗期灌溉需水量最大,平均值为 88.65 mm,其次是播种—分蘖期和分蘖—越冬期,平均值分别达到 43.67 和 52.01 mm,越冬—返青期、返青—拔节期和抽穗成熟期灌溉需水量较少,平均值都在 20 mm 以下。

2.3　成因分析

2.3.1　*冬小麦生育期气候要素变化特征*　对石河子地区冬小麦主要生育阶段的气候要素的变化率进行分析(表 1),从表中可以看出,在冬小麦全生育期,平均相对湿度呈减少趋势,且达到了显著水平;在各个生育期,平均相对湿度也都呈减少趋势但未达到显著水平,其中越冬—返青期和返青—拔节期减少趋势较大。全生育期日照时数略呈增加趋势,而在越冬—返青期日数时数则呈显著的减少趋势,其他时段呈增加趋势,且在拔节—抽穗期和抽穗—成熟期都达到了显著水平。全生育期平均水汽压呈增加趋势,且达到 0.05 显著水平,自播种—分蘖期至拔节抽穗期平均水汽压变化趋势与全生育期一致,但抽穗成熟期则呈减少趋势。冬小麦的全生育期平均风速减少趋势,且达到了 0.01 显著水平;且在播种—分蘖期、分蘖—越冬期、越冬—返青期和返青—拔节期,平均风速减少趋势也达到了显著水平,但在拔节—抽穗期和抽穗—成熟期平均风速减少趋势未达到显著水平。全生育期平均气温呈明显的增加趋势,且达到了 0.01 显著水平,且在各生

育期内，仅越冬—返青期未达到显著水平，其他各生育期内都达到 0.05 以上显著水平。全生育期内降水量的增势较大，且除拔节—抽穗期和抽穗—成熟期以外，其他各生育期降水量的气候倾向率都达到了显著水平。综合分析可以看出，石河子地区整体呈明显的暖湿化趋势，这是区域水热资源的变化是对全球变化的相应。但是，由于水热资源的年际和年内分配不均，各个生育期水热资源增势彼此有较大的差异。

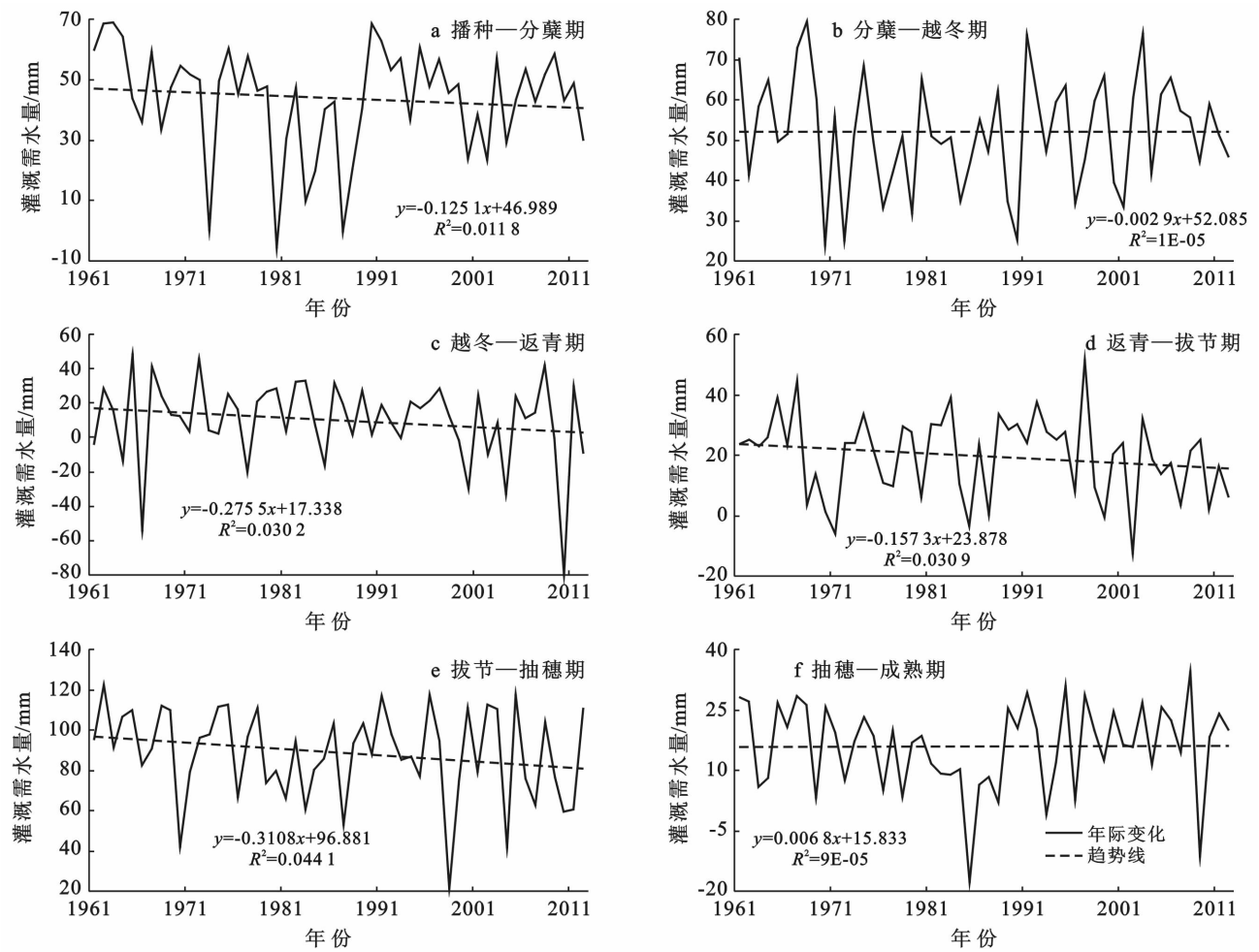


图 2 冬小麦不同生育期灌溉需水量的变化特征

表 1 冬小麦不同生育期气象因子变化趋势

气象因子	全生育期	播种—分蘖期	分蘖—越冬期	越冬—返青期	返青—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—成熟期
平均相对湿度/℃	−0.77*	−0.02	−0.78	−0.98	−0.98	−0.64	−1.02
日照时数/h	0.09	0.11	0.09	−0.37**	0.17	0.28*	0.25*
平均水汽压/hPa	0.77*	1.99	1.32	0.481	0.77	0.75	−0.73
平均风速/(m·s^{-1})	−0.11**	−0.13*	−0.10**	−0.09**	−0.14**	−0.12	−0.07
平均气温/℃	0.45**	0.51**	0.53**	0.45	0.49*	0.37**	0.36*
降水量/mm	24.90	1.05**	3.77**	14.84**	2.87*	2.55	−0.17

注：* * 和 * 分别表示通过了 0.01 和 0.05 置信度检验。下同。

2.3.2 *作物需水量与气候要素的关系* 为进一步探究石河子地区冬小麦不同生育期气候要素对需水量的影响，分别对各生育期冬小麦需水量和气候要素做相关分析，结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出，全生育期的冬小麦需水量与平均相对湿度、日照时数、平均水汽压、平均风速、平均气温和降水量都呈负相关，其中与平均风速、平均气温相关性较高。但在不同的生育期，气象因子与冬小麦需水量有所不同。平均相对湿度在播种—分蘖期和抽穗—成熟期与冬小麦生育期作物需水量呈负相关，且在抽穗—成熟期的负相关达到显著水平；而在播种—分蘖期、分蘖—越冬期、越冬—返青期、返青—

拔节期、拔节—抽穗期和抽穗—成熟期呈正相关。日照时数与冬小麦作物需水量以负相关为主,且在抽穗—成熟期达到极显著水平,仅仅在分蘖—越冬期呈正相关。平均水汽压与冬小麦生育期作物需水量在播种—分蘖期、越冬—返青期和抽穗—成熟期呈负相关,在其他生育期呈正相关。各生育期平均风速与冬小麦生育期作物需水量都呈正相关,且在抽穗—成熟期相关性最大。平均气温与冬小麦生育期作物需水量的相关性在分蘖—越冬期和返青—拔节期呈负相关,在播种—分蘖期、越冬—返青期、拔节—抽穗期和抽穗—成熟期呈正相关,且在抽穗—成熟期的相关性达到极显著水平。降水量与冬小麦生育期作物需水量在生育期的前期和中期都呈正相关,在抽穗—成熟期呈负相关。

表 2　冬小麦不同生育期作物需水量与气候要素的关系

气象因子	全生育期	播种—分蘖期	分蘖—越冬期	越冬—返青期	返青—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—成熟期
平均相对湿度	−0.15	−0.09	0.00	0.12	0.19	0.06	−0.30*
日照时数	−0.03	−0.12	0.10	−0.23	−0.23	−0.11	0.41**
平均水汽压	−0.11	−0.01	0.00	−0.05	0.11	0.07	−0.11
平均风速	−0.26	0.18	0.24	0.03	0.06	0.09	0.27
平均气温	−0.26	0.10	−0.00	0.14	−0.06	0.01	0.39**
降水量	−0.05	0.05	0.02	0.19	0.21	0.00	−0.08

2.3.3　灌溉需水量与气候要素的关系　为进一步探究石河子地区冬小麦不同生育期气候要素对灌溉需水量的影响,分别对各生育期冬小麦灌溉需水量和气候要素做相关分析,结果如表 3 所示。可以看出,在全生育期,冬小麦生育期灌溉需水量与平均相对湿度、平均水汽压、和降水量呈极显著的负相关,且与降水量相关性极强;与日照时数、平均气温和平均风速呈正相关,其中与平均风速呈极显著正相关。在各生育期,平均相对湿度与冬小麦各生育期灌溉需水量都成负相关,且除分蘖—越冬期以外,其他生育时段都呈显著的负相关。日照时数与冬小麦各生育期灌溉需水量呈正相关,其中在播种—分蘖期和分蘖—越冬期两者的正相关性达到显著水平。平均水汽压与冬小麦各生育期灌溉需水量都呈负相关,且在播种—分蘖期、返青—拔节期和抽穗—成熟期都达到显著水平。平均风速与冬小麦各生育期灌溉需水量都呈正相关,且在冬小麦生长后期正相关达到显著水平。平均气温与冬小麦各生育期灌溉需水量都呈正相关,且仅仅在抽穗—成熟期两者的相关性达到极显著水平。降水量与冬小麦各生育期灌溉需水量都呈负相关,且相关性在分蘖—越冬期、越冬—返青期和返青—拔节期以及抽穗成熟期达到 0.01 显著水平。

表 3　冬小麦不同生育期灌溉需水量与气候要素的关系

气象因子	全生育期	播种—分蘖期	分蘖—越冬期	越冬—返青期	返青—拔节期	拔节—抽穗期	抽穗—成熟期
平均相对湿度	−0.56**	−0.44**	−0.58**	−0.27	−0.45**	−0.39**	−0.68**
日照时数	0.26	0.30*	0.62**	0.33	0.19	0.04	0.28
平均水汽压	−0.47**	−0.31*	−0.25	−0.21	−0.30*	−0.21	−0.39**
平均风速	0.42**	0.34	0.09	0.05	0.02	0.32*	0.41**
平均气温	0.22	0.11	0.16	−0.05	0.23	0.20	0.52**
降水量	−0.73**	−0.64	−0.53**	−0.62**	−0.64**	−0.20	−0.86**

3　讨 论

判断作物水分亏缺状况并建立科学合理的灌溉制度,不仅需要对作物全生育期水分亏缺进行探究,还需要及时跟踪并分析不同生育期内作物水分需求和灌溉需求状况[15-16]。本文研究了不同生育期冬小麦作物需水量、灌溉需水量及其与气象因子的相关性,表明拔节—抽穗期作物需水量和灌溉需水量最大,这与前人的研究结论基本一致[15,17-18]。石河子垦区的小麦旱灾风险仍然较高[19],因此,做好农垦区冬小麦拔节—抽穗期的灌溉和水资源的管理对于冬小麦的增产和增收有至关重要的作用。不同生育期灌溉需水量表明石河子垦区农业的发展对灌溉有很强依赖性,在冬小麦不同的生育期都存在水分匮缺,这与研究结果是一致的。

气候变化下,过去 50 a 垦区冬小麦需水量总体呈增加趋势,越冬—返青期增势最为明显。伴随着需水量的增加趋势,灌溉需水量却都呈减少趋势,其中,拔节—抽穗期减少趋势最为明显。过去 50 a 垦区降水量的增势达到 24.90 mm/10 a,且在越冬—返青期

增势最明显，为 14.84 mm/10 a(表 1)，而越冬—返青期作物需水量的增势为 2.65 mm/10 a(图 1)，两者相差达到约 6 个数量级。因此，降水量的增加对于垦区灌溉需水量的减少有很大的贡献。冬小麦抽穗—成熟期作物需水量与气象因子有很强的相关性，而在其他生育期相关性达不到显著的水平，但是冬小麦灌溉需水量与气象因子的显著相关性则表现在各个生育期；灌溉需水量是基于作物需水量和降水量计算所得，冬小麦作物需水量和灌溉需水量与气象因子的相关性受到降水量的影响，这进一步表明降水量对于垦区冬小麦的水分需求和匮缺有重大的影响。

全生育期作物需水量与气象因子都呈明显的负相关但未达到显著水平(表 2)，灌溉需水量与平均相对湿度、平均水汽压和降水量呈负相关且达到极显著水平，与日照时数、平均风速和平均气温呈正相关(表 3)，而平均相对湿度和平均风速呈减少趋势，日照时数、平均风速、平均水汽压和降水量呈增加趋势(表 1)，各因子对于作物需水量和灌溉需水量有极为复杂的作用，如何在预测气候变化下对作物需水量和灌溉需水量进行科学而精确的预估，从而有效地指导农业生产，这有待进一步研究。

4 结 论

(1) 过去 50 a，石河子垦区冬小麦需水量总体呈增加趋势，越冬—返青期增势最为明显，气候倾向率为 2.65 mm/10 a；拔节—抽穗期冬小麦需水量最大，为 130.23 mm。灌溉需水量总体呈减少趋势，其中拔节—抽穗期灌溉需水量最大(平均值为 88.65 mm)且减少趋势最为明显(气候倾向率为 −3.11 mm/10 a)。

(2) 气象因子对冬小麦不同生育期的需水量和灌溉需水量有重要的影响。各气象因子在冬小麦不同生育期与灌溉需水量有较强的相关性，在生育期后期需水量与气象因子有极强的相关性；其中降水对于灌溉需水量影响最大。

本文仅仅对典型的石河子垦区的作物需水量和灌溉需水量及其与气象因子的相关性进行了研究，新疆作为典型的灌溉区，进一步增大研究尺度探究气候变化下全疆作物需水量和灌溉需水量的时空异质性及其可能的演变趋势，有待进一步研究。

[参 考 文 献]

[1] 刘晓英，李玉中，郝卫平. 华北主要作物需水量近 50 a 变化趋势及原因[J]. 农业工程学报，2005，21(10)：155-159.

[2] 符娜，刘小刚，张岩石，等. 西南地区水稻灌溉需水量变化规律[J]. 生态学杂志，2014，33(7)：1895-1901.

[3] 李摇勇，杨晓光，叶摇清，等. 1961—2007 年长江中下游地区水稻需水量的变化特征[J]. 农业工程学报，2011，27(9)：175-183.

[4] 杨晓琳，黄晶，陈阜，等. 黄淮海农作区玉米需水量时空变化特征比较研究[J]. 中国农业大学学报，2011，16(5)：26-31.

[5] 南纪琴，肖俊夫，刘战东，等. 不同水文年型北方春玉米需水量时空变化特征研究[J]. 灌溉排水学报，2014，33(4/5)，45-49.

[6] 宋妮，孙景生，王景雷，等. 河南省冬小麦需水量的时空变化及影响因素[J]. 应用生态学报，2014，25(6)：1693-1700.

[7] 杨晓琳，宋振伟，王宏，等. 黄淮海农作区冬小麦需水量时空变化特征及气候影响因素分析[J]. 中国生态农业学报，2012，20(3)：356-362.

[8] 蔡超，任华堂，夏建新. 气候变化下我国主要农作物需水变化[J]. 水资源与水工程学报，2014，25(1)：71-75.

[9] 李玉义，逄焕成，张凤华，等. 新疆石河子垦区主要作物需水特征及水效益比较[J]. 西北农业学报，2009，18(6)：138-142.

[10] 曾胜和，付明鑫，张磊，等. 滴灌春小麦高效施肥技术试验研究[J]. 干旱区研究，2010，27(5)：806-811.

[11] Karimov A K, Šimunek J, Hanjra M A, et al. Effects of the shallow water table on water use of winter wheat and ecosystem health: Implications for unlocking the potential of groundwater in the Fergana Valley(Central Asia)[J]. Agricultural Water Management, 2014, 131(1): 57-69.

[12] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[M] // FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, 1998, 300(9): D05109.

[13] 周瑾龙，虎胆·吐马尔白，董新光，等. 新疆平原区大气降水、灌溉水、土壤水与地下水转化关系研究[M]. 乌鲁木齐：新疆科技卫生出版社，2002.

[14] Tiwari K N, Kumar M, Santosh D T, et al. Influence of drip irrigation and plastic mulch on yield of sapota (achraszapota) and soil nutrients[J]. Irrigation & Drainage Systems Engineering, 2014(3): 1-8.

[15] 王鹏云，王辉，李万春，等. 昆明小麦生长期需水量和缺水状况研究[J]. 麦类作物学报，2010，30(1)：111-115.

[16] 吕丽华，李谦，董志强，等. 灌水方式和灌溉量对冬小麦根冠结构的影响[J]. 麦类作物学报，2014，34(11)：1537-1544.

[17] 史宝成，刘钰，蔡甲冰. 不同供水条件对冬小麦生长因子的影响[J]. 麦类作物学报，2007，27(6)：1089-1095.

[18] 刘钰，汪林，倪广恒，等. 中国主要作物灌溉需水量空间分布特征[J]. 农业工程学报，2009，25(12)：6-12.

[19] 王志强，方伟华，史培军，等. 基于自然脆弱性的中国典型小麦旱灾风险评价[J]. 干旱区研究，2010，27(1)：6-12.